

DOI: 10.7667/PSPC161285

# 限流串抗器接入电网对继电保护的影响及整定原则研究

李 锋<sup>1</sup>, 樊艳芳<sup>1</sup>, 王晓飞<sup>2</sup>, 林雪峰<sup>3</sup>

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 国网新疆电力调度控制中心, 新疆 乌鲁木齐 830002;  
3. 新疆电力设计院, 新疆 乌鲁木齐 830001)

**摘要:** 串抗的接入极大地抑制了电力系统的短路电流, 与此同时给电力系统的继电保护带来了一定的负面影响。利用电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 仿真正常状态下以及故障状态下串联电抗器对继电保护的影响, 分析找出其对继电保护影响的机理。以此为基础, 提出了基于串联电抗器不同安装位置的继电保护整定方案, 在同一安装位置的整定方案中又进一步提出了不同的整定原则。通过对比分析出不同原则整定方案的优缺点, 找出能最大限度降低串联电抗器接入后对继电保护影响的最优整定原则, 为后期工程应用提供了理论基础。

**关键词:** 串联电抗器; 短路电流; 不同安装位置; 继电保护; 整定原则

## Influence of current limiting series reactor connected to the power grid on relay protection and research on the principle of the corresponding setting

LI Feng<sup>1</sup>, FAN Yanfang<sup>1</sup>, WANG Xiaofei<sup>2</sup>, LIN Xuefeng<sup>3</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China;  
2. State Grid Xinjiang Communication Center for Power Dispatching, Urumqi 830002, China;  
3. Xinjiang Electric Power Design Institute, Urumqi 830001, China)

**Abstract:** Access of series reactor greatly restrains the short circuit current of power system. At the same time, it brings some negative effects to the relay protection of power system. In this paper, electromagnetic transient simulation software PSCAD/EMTDC is used to simulate the influence of series reactor in normal state and fault state on relay protection. And the mechanism of its influence on relay protection is analyzed and found out. On this basis, the relay protection setting scheme based on the different installation position of series reactor is proposed, and different setting principles in the setting scheme of the same installation position are put forward further. Through the comparison and analysis of the advantages and disadvantages of different principles of setting schemes, the optimal setting principle which can minimize the influence of series reactor on relay protection is found out, which provides theoretical basis for the later engineering application.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51467019).

**Key words:** series reactor; short-circuit current; different installation position; relay protection; setting principle

## 0 引言

随着电网的飞速发展, 电网的规模越来越大, 电网之间的联系也越来越紧密, 在供电可靠性增强的同时, 系统的短路电流水平也越来越高, 严重地制约着电网的发展<sup>[1-3]</sup>; 串联电抗器(后文简称“串抗”)的接入在很大程度上抑制了短路电流的攀升,

极大地提高了电网的机组接纳能力, 同时串抗的接入对系统的稳态以及功角稳定和暂态电压稳定影响不大, 对网损的影响也很小, 可忽略不计, 因此, 在一定程度上串抗的接入促进了电网的发展。

串抗的接入在抑制短路电流的同时, 也为电力系统带来了一定的负面影响, 此前的研究多集中在串抗在抑制短路电流方面所起的作用<sup>[4-5]</sup>, 少有学者注意到串抗给电网带来的负面影响; 由文献[6-8]可知当对发电机组进行失磁和失步保护整定时, 均需

应用到整定机组对系统的联系电抗  $X_{con}$ , 而  $X_{con}$  又与系统的等效阻抗有关, 当在系统中加装串抗时必然会引起系统阻抗的变化, 因此会影响到机组失磁保护与失步保护的整定; 除此之外, 串抗的接入还对输电线路工频过电压、瞬态恢复过电压等产生了一定的影响<sup>[9-11]</sup>; 文献[12]分析了串抗接入后对距离保护的影响, 同时提出将电压互感器移至串抗的线路侧, 但分析只限于将串抗接入线路上的情况, 却忽视了将串抗接入主变高压侧的情况, 因此分析不够全面; 文献[13]提出在对现有接入串抗线路整定原则进行改进的同时需在串抗接入的线路上配置电容式电压互感器(CVT), 此方法虽在一定程度上减弱了串抗对继电保护的影响, 但是却不够经济。本文在考虑经济性的前提下进行整定原则上的调整, 以期达到理想的效果。

本文仿真分析了串抗器接入电网后对继电保护

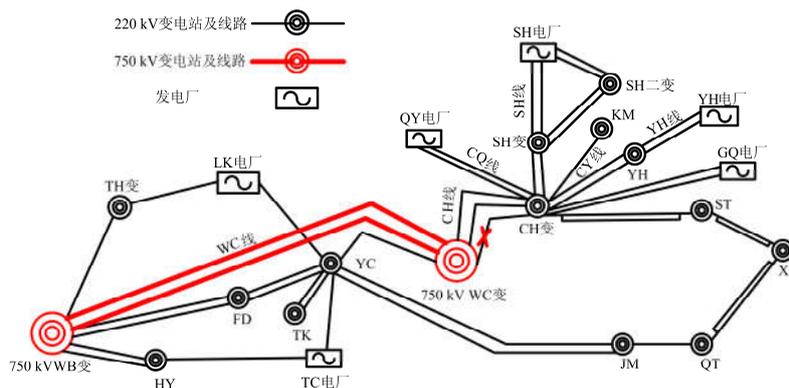


图 1 新疆某地区电气接线图

Fig. 1 Electrical wiring diagram of a region in Xinjiang

本文以串抗接入前后 CH 变三相短路电流的变化为例来阐述串抗的接入对短路电流的影响, 如图 1 所示。若在 QY 电厂、SH 电厂、YH 电厂和 GQ 电厂 12 台机组全部投运且 750 kV WC 变、220 kV CH 变全接线方式下, CH 变 220 kV 三相短路电流将达到 50.4 kA, 超过 CH 变 220 kV 断路器 50 kA 开断短路电流能力, 即使断开 220 kV CH 三线, CH 变短路电流也只能下降至 49.2 kA, 虽然低于断路器标称的开断能力, 但几乎没有任何裕度。为降低该地区短路电流水平, 提升该地区机组接纳空间, 考虑在该地区自备电厂加装高压限流串联电抗器。串抗的安装位置不同时其限流效果也不尽相同, 由仿真分析可知, 串抗加装在电厂侧的限流效果要明显好于加装

的影响, 通过对其影响机理的分析, 根据串抗的不同安装位置提出了两种不同的整定方案, 在同一安装位置的整定方案下又进一步提出几种不同的整定原则, 然后对这几种不同的整定原则进行对比分析, 从而找出更加适合工程实际的整定原则。

## 1 新疆某地区电网结构及短路电流水平

本文以新疆某地区的实际情况为例来分析串抗接入的迫切性, 该地区的电气接线图如图 1 所示。

截至 2015 年, 新疆某地区负荷已达到了 270 万 kW, 电源装机已达 12 台, 容量 420 万 kW。随着 750 kV WC 变及 WC 线一、二线投运, 该区域供电可靠性得到了较大提高, 但与此同时, 该区域的短路电流水平也呈现了大幅上升, 从而限制了该地区机组继续接入。

在系统侧, 因此目前一般考虑将串抗加装在送出线的发电厂侧或发电厂升压变高压侧, 如图 2 所示。

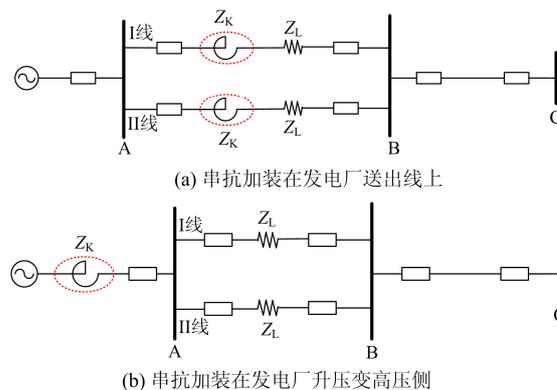


图 2 串抗不同安装位置示意图

Fig. 2 Series reactor with different installation locations

针对串抗不同的安装位置，在 psasp 中搭建了该区域仿真模型，对该地区短路电流水平受串抗安

装位置影响的敏感性进行对比分析，其结果如表 1 所示。

表 1 加装串抗敏感性分析

Table 1 Sensitivity analysis of series reactor in different positions

电厂名称	串抗阻值/ $\Omega$	安装位置	CH 变 220 kV 三相短路电流下降幅值/ kA
YH 电厂	2×15	YH 线一、二线电厂侧	1.2
	2×15	两台升压变高压侧	1.2
QY 电厂	4×15	CQ 线一、二线和#3、#4 主变高压侧	3.4
	4×15	QY 电厂四台升压变高压侧	1.8
	2×20	CQ 线一、二线	4.4

由表 1 可知，对于双台发变组通过双回线路接入系统的电厂，限流串抗器安装在送出线路侧和升压变高压侧时限流效果是一致的。对于四台发变组通过双回线路接入系统的电厂，限流串抗器安装在送出线路侧的限流效果明显好于安装在升压变高压侧。目前该地区选择将串抗加装在发电厂送出线上。当在 YH 电厂、QY 电厂的送出线上加装限流串抗器时，通过仿真分析可知限流串抗器阻值变化对限制短路电流的效果，如图 3 所示。

由上文分析可知，从整体上来讲，串抗加装在发电厂送出线上的限流效果要优于加装在发电厂升压变高压侧。但由表 1 可知，在某些情况下串抗加装在送出线上与加装在主变高压侧的限流效果相同，此时虽然限流效果相同，但不同安装位置的串抗对继电保护的影响孰轻孰重还未知，因此在本文的后期工作中将会对串抗加装在不同位置时对保护的影响进行探讨，在综合考虑限流效果和对继电保护影响的双重因素下找出最佳的保护整定方案。

## 2 串抗的接入对继电保护的影响

本文以 YH 线上配置的保护为例来仿真分析串抗接入后对继电保护的影响。首先对 220 kV YH 电厂-YH 变-CH 变输变网络进行简化，简化后的系统接线如图 4 所示。图中标出了研究线路及与研究线路相邻的线路的长度配置情况，相邻线路的等效耦合情况在图中略去。

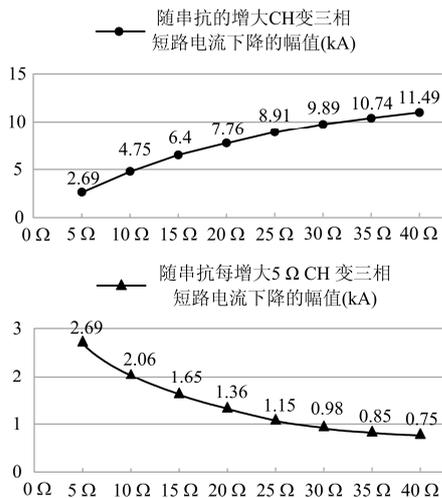


图 3 不同阻值的串抗器对短路电流的限制效果

Fig. 3 Inhibitory effect of the series reactor with different resistance to short current

从图 3 可以看出：随着限流串抗器阻值的增加，CH 变短路电流呈下降趋势，但是当阻值增加至 20~25  $\Omega$  以后，短路电流下降的趋势有所减缓。综合限流效果和设备造价等因素，建议串抗阻值选择不超过 20  $\Omega$ 。在本文的后期分析中取 YH 电厂增加的串抗阻值为 15  $\Omega$ ，QY 电厂的 4 台串抗均选择 20  $\Omega$ ，经过进一步的仿真分析可知，在此种情况下，CH 变的三相短路电流下降了 7.4 kA，极大地降低了短路电流，同时提高了该地区的机组接纳能力。

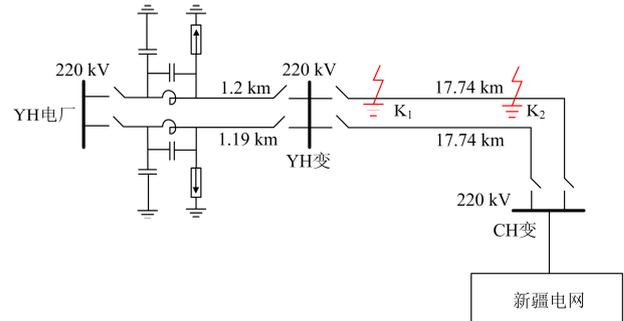


图 4 220 kV YH 电厂-YH 变-CH 变等值简化系统接线示意图

Fig. 4 Equivalent simplified system connection of 220 kV YH power plant-YH substation-CH substation

1) 串抗接入后，当串抗内部 50%的线圈发生匝间短路后在图 4  $K_1$  点(7.74 km 处)发生单相接地短路时的阻抗图如图 5(a)所示；当串抗内部 50%的线圈发生匝间短路后在图 4  $K_2$  点(15 km 处)发生单相接地短路时的阻抗图如图 5(b)所示。

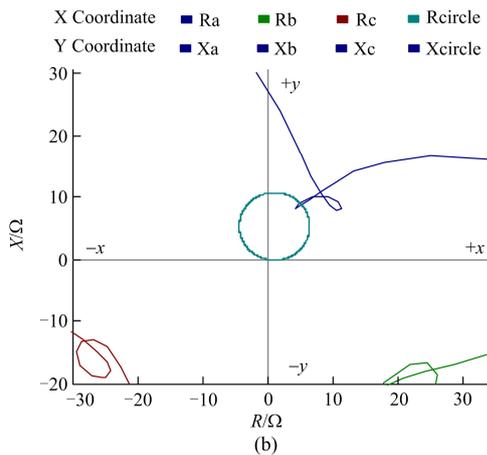
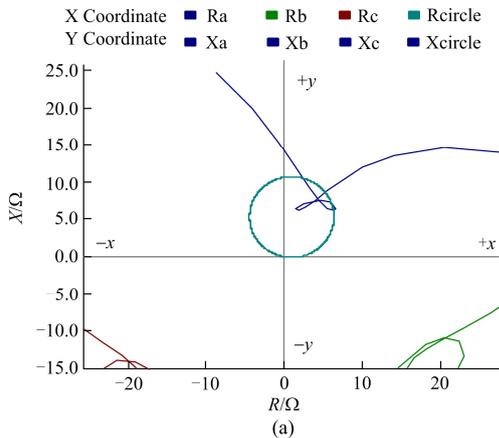


图 5 故障时的测量阻抗图  
Fig. 5 Measuring impedance at fault

由图 5 可知, 加入串抗后距离保护测量阻抗无法反映实际故障点, 距离保护整定配合风险较大, 在串抗阻值变小时(如匝间短路), 将造成越级误动, 严重时可能越多级误动。

2) 当串抗内部发生单相接地故障后, 线路的短路电流如图 6 所示。图 6(a)、图 6(b)分别代表 A 相线路上的串抗内部 25%、75%处发生短路接地时, 线路上的短路电流。

由于保护无法区分是线路故障还是串抗故障, 线路跳闸后启动重合闸动作, 由图 6 可知 A 相线路上串抗内部 25%、75%处发生短路接地时, A 相线

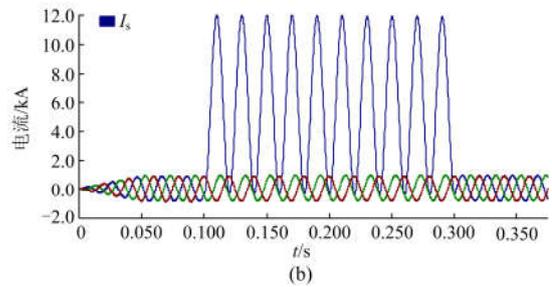
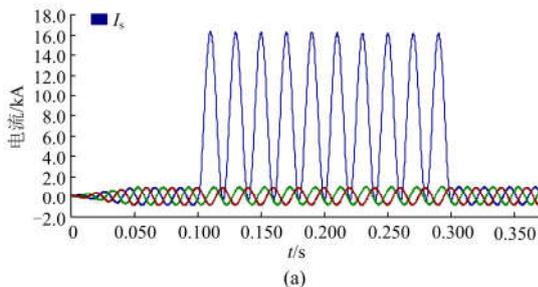


图 6 串抗内部故障时线路上的短路电流  
Fig. 6 Short circuit current on the line when the internal fault of series reactor

路上的短路电流最大值分别为 16.22 kA、11.93 kA, 由技术说明书可知, 该电抗器的额定电流为 2500 A, 很显然重合后的瞬时电流远大于其额定电流, 可能会进一步加重串联电抗器内部的损伤程度, 因此对线路的重合闸装置提出了更高的要求。

### 3 串抗不同接入方案的保护整定原则分析

串抗安装在不同位置上的限流效果不一样, 对保护的影响也不尽相同, 本文在串抗接入方案一(串抗加装在发电厂送出线上)和接入方案二(串抗加装在升压变高压侧上)的基础上提出不同的整定原则, 通过分析对比以期从中找出适合串抗接入后的继电保护整定原则。

#### 3.1 串抗安装在线路上

当串抗安装在线路上时, 如图 7 所示。

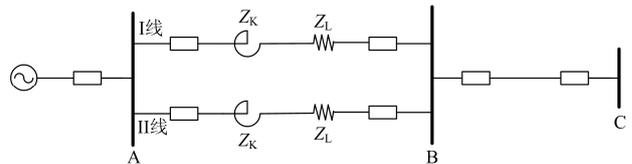


图 7 串抗安装在线路上时的接线示意图  
Fig. 7 Wiring diagram of series reactor installed on line

##### 1) 整定原则一

A 侧线路保护距离 I 段定值按  $0.7 \times (Z_k + Z_L)$  整定, B 侧按  $0.7 \times Z_L$  整定。为防止区外故障距离保护超越, 长度小于 10 km 的 220 kV 线路, 距离保护 I 段停用。

A 侧线路保护距离 II 段按大于  $K_{LM} \times (Z_k + Z_L)$ 、小于  $0.75 \times (Z_k + Z_L + Z_{ZBB})$  整定, 两者取小值。B 侧线路保护距离 II 段按大于  $K_{LM} \times (Z_k + Z_L)$ 、小于  $0.75 \times (Z_k + Z_L + Z_{ZBA})$  整定, 两者取小值。

$Z_{ZBA}$  指 A 侧主变阻抗,  $Z_{ZBB}$  指 B 侧主变阻抗。 $K_{LM}$  取值: 50 km 以下线路, 不小于 1.45; 50~100 km 线路, 不小于 1.4, 下同。

A、B 两侧线路保护距离 III 段按固定值  $50 \Omega$  设置。

优点：当串抗发生匝间短路或阻抗变小时，距离保护越级范围相对较小。缺点：因  $Z_K$  远大于  $Z_L$ ，故造成 A 侧距离 I 段保护正常保护范围严重降低甚至无法伸出串抗，当串抗发生匝间短路或阻抗变小时，A、B 两侧距离 II、III 段保护均会越级。

### 2) 整定原则二

A 侧线路保护距离 I 段定值按  $Z_K+0.7 \times Z_L$  整定，B 侧按  $0.7 \times Z_L$  整定。为防止区外故障距离保护超越，长度小于 10 km 的 220 kV 线路，距离保护 I 段停用。

A 侧线路保护距离 II 段按大于  $K_{LM} \times (Z_K+Z_L)$ 、小于  $0.75 \times (Z_K+Z_L+Z_{ZBB})$  整定，两者取小值。B 侧线路保护距离 II 段按大于  $K_{LM} \times (Z_K+Z_L)$ 、小于  $0.75 \times (Z_K+Z_L+Z_{ZBA})$  整定，两者取小值。

A、B 两侧线路保护距离 III 段按固定值  $50 \Omega$  设置。

优点：A 侧距离 I 段保护正常保护范围能够覆盖线路全长的 70%。缺点：当串抗发生匝间短路或阻抗变小时，距离 I 段保护越级范围非常大，A、B 两侧距离 II、III 段保护均会越级。

### 3) 整定原则三

A 侧线路保护距离 I 段定值按  $0.7 \times Z_L$  整定，B 侧按  $0.7 \times Z_L$  整定。为防止区外故障距离保护超越，长度小于 10 km 的 220 kV 线路，距离保护 I 段停用。

A 侧线路保护距离 II 段按大于  $K_{LM} \times (Z_K+Z_L)$ 、小于  $0.75 \times (Z_K+Z_L+Z_{ZBB})$  整定，两者取小值。B 侧线路保护距离 II 段按大于  $K_{LM} \times (Z_K+Z_L)$ 、小于  $0.75 \times (Z_K+Z_L+Z_{ZBA})$  整定，两者取小值。

A、B 两侧线路保护距离 III 段按固定值  $50 \Omega$  设置。

优点：当串抗发生匝间短路或阻抗变小时，A 侧距离 I 段保护不会越级。缺点：因  $Z_K$  远大于  $Z_L$ ，故造成 A 侧距离 I 段保护正常保护范围无法伸出串抗，A 侧近端(30%范围以内)发生故障，距离 I 段保护将无法动作，当串抗发生匝间短路或阻抗变小时，A、B 两侧距离 II、III 段保护均会越级。

## 3.2 串抗安装在升压变高压侧

当串抗安装在发电厂升压变高压侧上时，如图 8 所示。

整定原则如下所述。

A 侧线路保护距离 I 段定值按  $0.7 \times Z_L$  整定，B 侧按  $0.7 \times Z_L$  整定。为防止区外故障距离保护超越，长度小于 10 km 的 220 kV 线路，距离保护 I 段停用。

A 侧线路保护距离 II 段按大于  $K_{LM} \times Z_L$ 、小于  $0.75 \times (Z_L+Z_{ZBB})$  整定，两者取小值。B 侧线路保护距

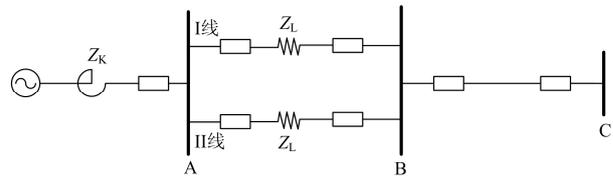


图 8 串抗安装在发电厂升压变高压侧的接线示意图

Fig. 8 Wiring diagram of series reactor installed in high voltage side of transformer in power plant

离 II 段按大于  $K_{LM} \times (Z_K+Z_L)$ 、小于  $0.75 \times (Z_K+Z_L+Z_{ZBA})$  整定，两者取小值。

A、B 两侧线路保护距离 III 段按固定值  $50 \Omega$  设置。

优点：正常情况下和串抗发生匝间短路或阻抗变小时，A、B 两侧距离 I 段保护均不会越级，A 侧距离 II、III 段保护均不会越级。缺点：当串抗发生匝间短路或阻抗变小时，B 侧距离 II、III 段保护均会越级。

## 4 结论

限流串联电抗器的接入在抑制了系统的短路电流的同时，也将引起线路阻抗发生变化，相当于使线路变长，因此串抗的投入对保护测量阻抗影响非常大，线路保护特别是与阻抗有关的纵联距离保护、III 段距离保护的保护区也相应变化，严重时会造成保护的误动或者拒动，降低了系统的安全性。在综合考虑串抗对继电保护和电网安全影响的情况下，本文通过仿真分析得到如下结论。

1) 当串抗加装在主变高压侧与安装在发电厂送出线上对短路电流的抑制作用都满足要求时，应优先考虑将串抗加装在发电厂主变高压侧上，同时选择该安装方案下的保护整定原则来进行保护的整定计算；此时在正常情况下和串抗发生匝间短路或阻抗变小时，A、B 两侧距离 I 段保护均不会越级，A 侧距离 II、III 段保护也均不会越级。

2) 当串抗加装在升压变高压侧抑制短路电流的效果达不到要求时，应选择将串抗加装在发电厂送出线上，同时建议选择该安装方案下的整定原则三来进行继电保护的整定，此时当串抗发生匝间短路或阻抗变小时，A 侧距离 I 段保护不会越级，但此时距离保护拒动、误动的风险将无法避免。

3) 为避免造成保护发生大范围越级误动，造成严重电网事故，串抗只考虑在终端发电厂侧加装，不考虑在环网线路或多级串供线路上加装。

本文针对串抗不同加装位置的方案，分析其各自对电网继电保护的影响，并提出几种不同的继电

保护整定原则, 通过对比各个整定原则的优缺点, 找出了兼顾限流效果与对继电保护影响最低的整定原则, 具有一定的工程应用价值。

### 参考文献

- [1] BO Z Q, LIN X N, WANG Q P, et al. Developments of power system protection and control. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2016, 1: 8pp. DOI 10.1186/s41601-016-0012-2
- [2] 李勇, 于芮技, 王英英, 等. 负荷对短路电流的影响研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(6): 40-45. LI Yong, YU Ruiji, WANG Yingying, et al. Research on the influence of load on short circuit current[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(6): 40-45.
- [3] 孙奇珍, 蔡泽祥, 李爱民, 等. 500 kV 电网短路电流超标机理及限制措施适应性[J]. *电力系统自动化*, 2009, 33(21): 92-96. SUN Qizhen, CAI Zexiang, LI Aimin, et al. A short-circuit current over-limited mechanism of 500 kV power system and the adaptability of limiting measures[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2009, 33(21): 92-96.
- [4] 许逵, 孙婷, 韩松, 等. 考虑运行损耗的故障限流器布点优化和容量选择[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(5): 21-26. XU Kui, SUN Ting, HAN Song, et al. Optimal sitting and parameter selection for fault current limiter constrained with power losses[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(5): 21-26.
- [5] 李军, 屈青雯, 王钧, 等. 限流电抗器的应用分析[J]. *陕西电力*, 2010, 38(8): 81-83. LI Jun, QU Qingwen, WANG Jun, et al. Application analysis on current limiting reactor[J]. *Shaanxi Electric Power*, 2010, 38(8): 81-83.
- [6] 张项安, 姚晴林, 陈海龙. 发电机失步保护整定计算所用的等值联系电抗  $X_{con}$  研究——与现行《大型发电机变压器继电保护整定计算导则》商榷[J]. *电力系统保护与控制*, 2014, 42(7): 97-102. ZHANG Xiang'an, YAO Qinglin, CHEN Hailong. Research on equivalent contact reactance  $X_{con}$  setting calculation for generator out-of-step protection — discuss with guide of calculating settings of relay protection for large generator and transformer[J]. *Power System Protection and Control*, 2014, 42(7): 97-102.
- [7] 林莉, 张向伍, 郭文宇, 等. 同步发电机失磁过程分析与保护方法研究[J]. *高电压技术*, 2014, 40(11): 3544-3553. LIN Li, ZHANG Xiangwu, GUO Wenyu, et al. Analysis on loss-of-excitation process and research on protection method of synchronous generators[J]. *High Voltage Engineering*, 2014, 40(11): 3544-3553.
- [8] 杨宏宇, 徐钢, 单华, 等. 发电机失步保护和失磁保护整定计算的研究[J]. *电工技术*, 2015(3): 22-24, 34. YANG Hongyu, XU Gang, SHAN Hua, et al. Research of calculating settings for the generator out of step and loss of excitation protection[J]. *Electric Engineering*, 2015(3): 22-24, 34.
- [9] 董楠, 杨柳, 吴鸿亮, 等. 地区电网理论线损计算需求数据合成方法研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(9): 47-53. DONG Nan, YANG Liu, WU Hongliang, et al. Demand data synthesis method of regional power grid theoretical line loss calculation[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(9): 47-53.
- [10] 陈水明, 王威, 杨鹏程. 限流电抗器对输电线路工频过电压的影响[J]. *电网技术*, 2010, 34(3): 193-196. CHEN Shuiming, WANG Wei, YANG Pengcheng. Effects of current-limiting inductor on power frequency overvoltages in transmission line[J]. *Power System Technology*, 2010, 34(3): 193-196.
- [11] 李金忠, 李芳, 韩晶, 等. 500 kV 母线串联电抗器对瞬态恢复过电压的影响及限制措施[J]. *高压电器*, 2014, 50(10): 63-69. LI Jinzhong, LI Fang, HAN Jing, et al. Effects of 500 kV bus sectionalizing reactor on transient recovery voltage and countermeasures[J]. *High Voltage Apparatus*, 2014, 50(10): 63-69.
- [12] 曹新民, 鲍伟. 串联电抗器的保护配置方案及对线路母线保护的影响分析[J]. *华东电力*, 2004, 32(11): 30-33. CAO Xinmin, BAO Wei. Analysis of protection configuration of series reactor and its effect on busbar protection of line[J]. *East China Electric Power*, 2004, 32(11): 30-33.
- [13] 王向平. 带串联电抗的线路保护配置方案[J]. *电力建设*, 2009, 30(11): 17-20. WANG Xiangping. Protection configuration scheme for over-head transmission line with series reactor[J]. *Electric Power Construction*, 2009, 30(11): 17-20.

收稿日期: 2016-08-11; 修回日期: 2016-09-23

作者简介:

李 锋(1989—), 男, 硕士研究生, 研究方向为含风电、光伏的电力系统稳定与控制; E-mail: 178358148@qq.com

樊艳芳(1971—), 女, 通信作者, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统稳定与控制、微电网控制技术。E-mail: 410849062@qq.com

(编辑 魏小丽)